

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-06>

EDN MXTTJJ

Оригинальная статья / Original paper



Анализ высокочастотной составляющей нейтронного шума на динамических режимах ВВЭР-1200

Г.В. Аркадов¹  , М.Т. Слепов²  

¹ Некоммерческое партнерство содействовало развитию системной инженерии «Райз», г. Москва, Российская Федерация, [✉ arkgen47@gmail.com](mailto:arkgen47@gmail.com)

² Филиал Акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежской области, Российская Федерация, [✉ slepovmt@vnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:slepovmt@vnpp1.rosenergoatom.ru)

Аннотация: В статье впервые поднимается проблема о возможности использования высокочастотной составляющей нейтронного шума для контроля состояния ТВС и ТВЭЛ во время эксплуатации, т.к. долгое время исследования нейтронного шума ограничивались частотой 50 Гц. В краткой исторической справке представлены основные моменты и этапы развития нейтронно-шумового контроля, а также персоналии отдельных ученых, внесших фундаментальный вклад в развитие нейтронно-шумовой диагностики. На примере данных Нововоронежской АЭС, полученных при динамических испытаниях в 2022 г., авторы показывают возможность оценки собственных колебаний органов регулирования СУЗ, как функции частота-глубина погружения в активную зону. Данная зависимость позволяет построить альтернативный канал контроля положения органов регулирования СУЗ. На основе спектральных оценок высокочастотного нейтронного шума обосновывается возможность выявления режима кипения теплоносителя с локализацией места по высоте ТВС. Впервые приводится оценка собственных частот колебаний ТВЭЛ (частей ТВЭЛ) на основе данных, полученных непосредственно во время эксплуатации. Собственные частоты представлены в виде конкретных числовых значений, а не в виде частотного диапазона, полученного по результатам стендовых испытаний. Представлен критический подход к проблеме предварительных испытаний макетов ТВС на различных стендах в части достаточности информации и ее обоснованности. Для удобства визуализации и сжатия информации вводится новое представление каскада спектров в виде контурных графиков, позволяющее максимально эффективно выявить общие закономерности на большом количестве данных. Аргументируется необходимость дальнейших исследований по нейтронно-шумовой тематике на действующих АЭС в связи с внедрением новой конструкции ТВС (ТВС-5), имеющей существенные отличия.

Ключевые слова: нейтронный шум, датчик прямого заряда, вибрация, активная зона, ТВС, ТВЭЛ, автоспектральная плотность мощности, когерентность, кипение, органы регулирования, стендовые испытания.

Для цитирования: Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Анализ высокочастотной составляющей нейтронного шума на динамических режимах ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):57–76. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-06>

For citation: Arkadov G.V., Slepov M.T. Analysis of a high-frequency component of neutron noise in VVER-1200 dynamic modes. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):57–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-06>

Analysis of a high-frequency component of neutron noise in VVER-1200 dynamic modes

Gennady V. Arkadov¹  , Mikhail T. Slepov²  

¹ «Rise» non-profit partnership for system engineering development support, Moscow, Russian Federation
[✉ arkgen47@gmail.com](mailto:arkgen47@gmail.com)

² Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of the Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation
[✉ slepovmt@vnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:slepovmt@vnpp1.rosenergoatom.ru)

Abstract: For the first time, the article raises the problem of the possibility of using the high-frequency component of neutron noise to monitor the state of fuel assemblies and fuel rods during operation, since for long-time neutron noise research was limited to a frequency of 50 Hz. A brief historical summary presents the main points and stages of the development of neutron noise control, as well as the personalities of individual scientists who have made fundamental contributions to the development of neutron noise diagnostics. Using the example of data from the Novovoronezh NPP obtained during dynamic tests in 2022, the authors show the possibility of estimating the natural fluctuations of the control bodies of the control system as a function of frequency-depth of immersion in the core. This dependence makes it possible to build an alternative channel for monitoring the position of the regulatory authorities. Based on spectral estimates of high-frequency neutron noise, the possibility of detecting the boiling mode of the coolant with localization of the location by the height of the fuel assembly is substantiated. For the first time, data (frequency composition) on possible natural fluctuations of fuel rods (parts of fuel rods) measured directly during operation is presented. These values are given in the form of specific values, and not in the form of a frequency range calculated based on the results of bench tests. A critical approach to the problem of preliminary tests of fuel assembly layouts at various stands in terms of the sufficiency of information and its validity is presented. For the convenience of visualization and compression of information, a new representation of the cascade of spectra is introduced in the form of contour graphs, which makes it possible to identify common patterns on a large amount of data as efficiently as possible. The necessity of further research on neutron noise issues at existing nuclear power plants is argued in connection with the introduction of a new fuel assembly design (TVS-5), which has significant differences.

Keywords: neutron noise, direct charge sensor, vibration, core, fuel assemblies, fuel elements, autospectral power density, coherence, boiling, control controls, bench tests.

Введение

Долгое время исследование нейтронных шумов считалось научным «вольнодумством» отдельных ученых и «побочным» результатом реакторных исследований. Однако по мере получения новых знаний, результаты таких исследований стали активно использоваться для диагностики состояния активных зон (АЗ) ВВЭР. В середине XX в. появились первые фундаментальные работы, где были обобщены основные достижения в анализе нейтронных шумов для подкритических реакторов. Теоретически и экспериментально было продемонстрировано, что на основе определенных статистических данных, полученных с помощью дискретных сигналов нейтронных датчиков, можно описать кинетические параметры активных зон. Это позволило разработать теорию нейтронного шума подкритического реактора.

Результаты исследований применялись на различных этапах разработки АЗ на критических сборках. В Физико-энергетическом институте (Обнинск) исследования шумов проводились группой под руководством А.И. Могильнера [1] (С.А. Морозов, А.О. Скоморохов [1,2]), а в Институте атомной энергии имени И.В. Курчатова (Москва) научная работа осуществлялась под руководством В.В. Булавина [3,4] (А.С. Кужиль,

В.И. Митин, А.Е. Савушкин). Следует отдельно выделить венгерскую школу по нейтронным шумам: Г. Кошай, автор теории нейтронного шума реактора с кипящим теплоносителем; Т. Катона, разработавший совместно с коллегами Г. Пором и Л. Меско нейтронно-температурную модель с аксиальной пространственной зависимостью [5,6].

Безусловно, работы по шумовой тематике в СССР, затем и в Российской Федерации запаздывали, а с учетом аутсайдерских позиций российской электроники и дальнейшей деградации экономики России, исчезли из планов работы базовых научно-исследовательских центров.

Начиная с «нулевых» годов XXI в. проблематикой нейтронного шума занимается исследовательская группа под руководством В.И. Павелко в составе Научно-технического центра «Диалог» (Москва), где разрабатываются и внедряются отечественные системы виброшумового мониторинга с нейтронно-шумовыми каналами для всей линейки отечественных реакторов ВВЭР (ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ). Благодаря работам В.И. Павелко [4,7,8] были разработаны алгоритмы обработки сигналов нейтронного шума, позволяющие идентифицировать аномальные состояния реакторной установки до

того момента, когда дефект будет обнаружен штатными средствами контроля, что с полным правом позволяет говорить о мировом уровне российской нейтронно-шумовой школы.

Однако, несмотря на наличие передовых теоретических работ по поднятой проблематике, вопросы прикладных исследований, т.е. непосредственно прямого реакторного эксперимента, остались вне сферы научных интересов отечественных и зарубежных ученых. Необходимость практических исследований обуславливается, прежде всего, сложностью интерпретации выявляемых с помощью шумовых методов разнообразных аномалий, необходимостью точной настройки различных моделей, существенными различиями в спектральных образах оборудования не только разных проектов РУ, но и однотипных блоков в пределах одной АЭС. Указанные выше проблемы невозможно решить только с помощью теоретических или расчетных методов, а также с использованием программных средств имитационного моделирования.

Отдельно необходимо остановится на ограничении ранее изучаемого в экспериментах, диапазона нейтронных шумов, как правило, частотой 50 Гц, что объясняется, с одной стороны, инертностью датчиков прямого заряда (ДПЗ), с другой отсутствием высокочувствительных измерительных средств токовых сигналов ионизационных камер (ИК) и ДПЗ, что нашло отражение даже в авторских монографиях [7,8]. С появлением технических средств прецизионного ДПЗ и разработкой авторами методологии многоканальных синхронизированных измерений (подробнее источники [7–10]) появилась возможность оценки нейтронных шумов в высокочастотном диапазоне. Так, в источнике [8] представлены некоторые спектральные оценки нейтронного шума в высокочастотном диапазоне, а в [10] доказана возможность использования высокочастотной составляющей нейтронного шума для оценки состояния АЗ. В представленной статье делается первая попытка подробно исследовать частотный диапазон нейтронного шума от 50 Гц до 200 Гц, который опти-

мален, по мнению авторов, для выделения, а впоследствии и оценки, вибрационного состояния твэл. Материал статьи целиком основан на анализе данных, полученных во время проведения динамических испытаний на энергоблоке 1 Нововоронежской АЭС-2 в 2022 г.

Тепловыделяющая сборка как объект нейтронно-шумового контроля

Активная зона реакторной установки (РУ) ВВЭР-1200 представляет собой совокупность из 163 тепловыделяющихборок (ТВБ) и 121 органа регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ), установленных внутри корпуса реактора в соответствии с картограммой загрузки активной зоны (рис. 1). Дистанционирование ТВБ обеспечивается посадкой концевых деталей в плите блока защитных труб (БЗТ) с одной стороны и в днище шахты внутрикорпусной (ШВК) с другой. Предотвращение всплытия и уменьшение вибрации ТВБ обеспечивается посредством упругого поджатия подпружиненных головок ТВБ крышкой реактора через БЗТ.

Регулирование мощности активной зоны осуществляется перемещением пучка поглощающих элементов (ПЭЛ) с помощью ОР СУЗ в направляющих каналах ТВБ. Аварийная защита осуществляется падением ПС СУЗ по сигналу АЗ под действием силы тяжести. Пучок ПЭЛ представляет собой конструкцию из 18 цилиндрических ПЭЛов, содержащих поглощающий материал в виде титаната диспрозия (Dy_2TiO_5) – керамика из семейства титанатов, в нижней части и карбида бора (B_4C) с природным содержанием изотопа ^{10}B , в верхней части, и закрепленных с помощью пружин индивидуальной подвески на захватной головке.

Все ОР СУЗ разбиты на 12 групп, каждая из которых содержит от 6 до 12 ОР СУЗ. ОР СУЗ каждой группы перемещаются одновременно. Определена неизменная (штатная) последовательность движения групп. Извлечение групп производится в порядке номеров от 1 до 12, погружение – в обратном порядке (подробнее [11]).

В новом энергоблоке ВВЭР-1200, в отличие от серийного блока ВВЭР-1000, активная зона претерпела следующие изменения:

– увеличена масса топлива за счет увеличения высоты топливного столба, уменьшения диаметра центрального отверстия и увеличения диаметра собственно топливной таблетки;

– увеличено число групп СУЗ и соответственно изменился регламент управления СУЗ, в частности уменьшилась глубина погружения ОР СУЗ в активную зону в номинальном режиме;

– применены перемешивающие решетки в верхней части ТВС;

– использована антивибрационная нижняя решетка (источник [12]).

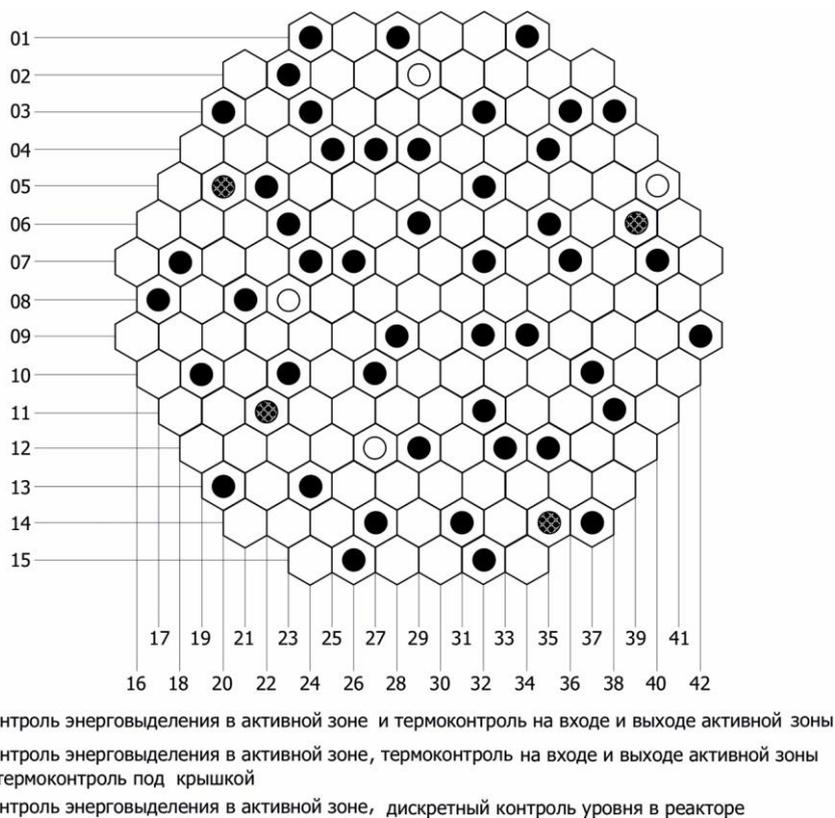


Рисунок 1. Компоновка активной зоны ВВЭР-1200 с размещением датчиков контроля внутризонного нейтронного потока

Figure 1. Layout of the VVER-1200 core with placement of sensors for monitoring the in-core neutron flux

Функции контроля параметров активной зоны РУ выполняет система внутриреакторного контроля (СВРК). Главной функцией СВРК является обеспечение безопасной и экономичной эксплуатации реактора путем сбора, обработки и представления информации о состоянии активной зоны. На рисунке 1 представлено размещение измерительных каналов (КНИ) СВРК в АЗ реактора по 7 датчиков прямого заряда (ДПЗ) в каждой, что обеспечивает контроль энерговыделения в 378 точках АЗ. В работах [8,10] представлены схемы коммутации технических средств, а в [9,10,13,14] описаны алгоритмы получения информации о состоянии ТВС

при совместном использовании штатных систем контроля и мобильных измерительных комплексов. В данной статье авторы акцентируют внимание читателей на том, что наличие мобильных измерительных систем на современных блоках, является необходимостью, так как опыт использования таких технических средств совместно со штатными (проектными) системами свидетельствует о возможности решения целого ряда задач от получения «тонкой структуры» нейтронных шумов до точной настройки каналов различных программно-технических комплексов. Гибкость в использовании мобильных систем позволяет работать с различны-

ми типами сигналов как для получения экспресс-оценок о состоянии оборудования, так и использования различных методов предиктивной аналитики, предоставляющих возможность получения долгосрочных трендов о состоянии оборудования.

Возвращаясь к подробному описанию конструктивных особенностей ТВС для ВВЭР-120 следует сказать, что каждая ТВС содержит 312 цилиндрических тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), расположенных с помощью дистанционирующих решеток по углам равномерной треугольной сетки и концевые детали. Под оболочкой ТВЭЛов находится керамическое ядерное топливо в виде таблеток из диоксида урана, в котором происходит цепная ядерная реакция. ТВЭЛы омываются теплоносителем, который обеспечивает необходимый теплосъем с поверхности ТВЭЛов и замедление быстрых нейтронов. Для выравнивания поля энерговыделения по радиусу активной зоны, уменьшения коэффициента размножения в начале цикла выгорания топлива и обеспечения работы реактора в области отрицательных коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя используются тепловыделяющие элементы с урангадолиниевым топливом (ТВЭГи). В качестве интегрированного выгорающего поглотителя используется гадолиний в виде оксида гадолиния (Gd_2O_3) с естественным содержанием изотопов. Концентрация выгорающего поглотителя в ТВЭГах выбирается такой, чтобы поглотитель практически полностью выгорал в течение одной топливной загрузки (по материалам источника [11]). На рисунке 2 представлен общий вид ТВС для ВВЭР-1200 с краткими характеристиками и расположением основных деталей, а на рисунке 3 показано взаимное расположение ДПЗ относительно ТВС в АЗ (по материалам [12]).

С точки зрения эксплуатационного контроля крайне желательно иметь информацию как об амплитудах вибрации ТВС, так и о частотном составе. На данный момент не существует методов, позволяющих измерить (рассчитать) амплитуду вибрации ТВС в абсолютных единицах во время работы энергоблока на мощности. В работе [15] предложен способ оценки вибрации ТВС по трем

ДПЗ в относительных единицах, но ввиду его непрактичности и сложности реализации, данный метод не используется на АЭС. Тем не менее, частотный состав вибрации можно измерять, используя единственный метод, показавший свою эффективность – анализ нейтронного шума ДПЗ. Главный конструктор РУ ВВЭР-1200 АО ОКБ «Гидропресс» проводит серии испытаний на различных стендах, имитирующих рабочие условия для макетов ТВС всех работающих блоков. К сожалению, несмотря на несомненную научную ценность, указанные источники не находятся в открытом доступе, что делает затруднительным цитирование необходимых данных. Поэтому авторы помимо источника будут приводить полную информацию об источнике цитирования, включая номера страницы и разделов (при наличии).

Согласно источнику [12], собственные частоты ТВС, полученные при проведении виброиспытаний на воздухе, т.е. без учета присоединенной массы теплоносителя, составляют величины сведенные в таблице 1 (источник [12], стр. 53, табл. 5.7.1). Приведенные данные коррелируют с другим источником [16] (табл. 2), что позволяет сделать вывод об изгибных колебаниях ТВС в диапазоне частот от 5 до 6 Гц. Несомненно, никакими стендовыми испытаниями и/или средствами имитационного моделирования невозможно воспроизвести рабочие режимы АЭС. Поэтому необходима валидация полученной таким образом информации на реальных объектах и при рабочих режимах.

Как было отмечено ранее, нейтронный шум ДПЗ свыше 50 Гц долгое время не исследовался. Считалось, что ДПЗ в силу своей инертности не регистрирует колебания нейтронного потока выше указанной частоты. Однако в реальности это не так. В работе [8] авторы приводят убедительные данные о наличии высокочастотных составляющих в сигналах нейтронного шума ДПЗ, вплоть до максимально возможной частоты регистрации (при частоте оцифровки исходного сигнала 1024 Гц), т.е. до частоты 512 Гц. В таблице 3 представлены данные о частотах вибрации макета ТВС-5 (конструктивный

аналог штатной ТВС ВВЭР-1200) в диапазоне от 50 до 512 Гц (по источнику [17], стр. 27, табл. 6). Подробное рассмотрение результатов исследований представленных как в [12], так и в [17], не является темой статьи, но авторы считают, что используемые методы спектрального оценивания не являются оптимальными, т.к. выделение спектральных особенностей происходит не в виде отдельных пиков (максимумов), а в ви-

де «интервальным» оценкам собственных частот (на примере данных табл. 3 интервал может достигать до 100 Гц). В реальности совместные колебания трубных пучков имеют разброс по частоте, не превышающий 10 Гц. Более подробно об эффективности использования различных весовых функций, длине выбранной для анализа временной реализации, количестве необходимых осреднений и др. можно ознакомиться в [18].

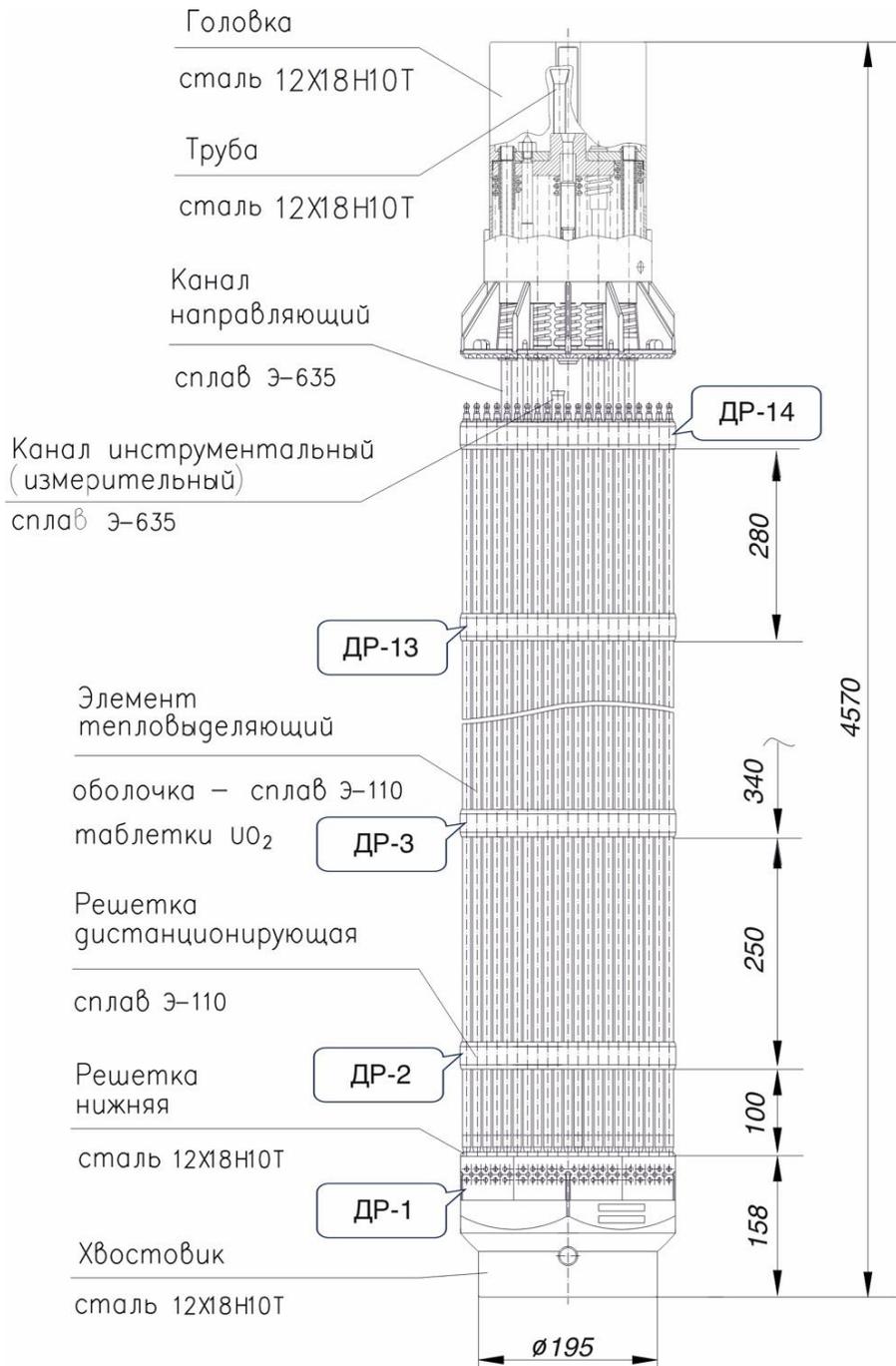


Рисунок 2. Общий вид и конструктивные особенности ТВС ВВЭР-1200
Figure 2. General view and design features of the VVER-1200 fuel assemblies

Таблица 1. Собственные частоты колебаний ТВС (по источнику [11] стр. 53, Табл.5.7.1 – Вибрационные характеристики макета ТВС-2006 как целого)

Table 1. Natural frequencies of fuel assembly vibrations (according to reference [11], p. 53, Table 5.7.1 – Vibration characteristics of the TOA-2006 model as a whole)

Частота, Гц	Коэффициент демпфирования, % от критического	Форма
5,3	1,1	Первая изгибная
8,2	1,3	Первая крутильная
10,8	2,2	Вторая изгибная
16,8	1,4	Вторая крутильная
17,5	1,1	Третья изгибная
23,1	0,7	Четвертая изгибная
25,0	0,9	Третья крутильная
29,5	0,9	Пятая изгибная
33,0	1,1	Четвертая крутильная

Таблица 2. Собственные частоты колебаний макета ТВС в зависимости от степени поджатия на воздухе и в воде (по источнику [15])

Table 2. Natural frequencies of the fuel assembly model depending on the compression degree in air and water (according to reference [15])

Среда	Осевое усилие, N, кН	Поджатие пружин λ , мм	Собственные частоты, Гц		
			f_1	f_2	f_3
Воздух, $T = 30^\circ C$	0	0	5,8	9,9	16,0
	6,3	10,8	6,7	10,2	17,9
	13,1	25,8	6,7	10,2	17,9
Вода, $T = 30^\circ C$	0	0	3,9	7,4	11,2
	6,3	10,8	4,8	7,4	11,8
	13,1	25,8	5,2	7,4	11,8

Таблица 3. Частоты (по источнику [17] стр. 27, табл. 6 – Частоты вынужденных и собственных колебаний виброизмерительных твэлов)

Table 3. Frequencies (according to reference [17], p. 27, Table 6 – Frequencies of forced and natural vibrations of vibration measuring transducers)

Пролеты	Диапазон частот, Гц	
	Вынужденные колебания в теплоносителе	Собственные колебания в воздухе
ДР1-ДР2	от 470 до 650	не выявлены
ДР2-ДР3	от 210 до 230	не выявлены
ДР4-ДР5, ДР11-ДР12	от 80 до 150	от 94 до 136
ДР12-ДР13	от 110 до 180	от 163 до 178
ДР13-ДР14	от 250 до 420	от 358 до 512

Особенности нейтронно-шумового контроля ТВС при динамических режимах

Долгое время стратегия спектральной оценки различных сигналов базировалась из условия их стационарности, т.е. применительно к реальным объектам, таким как роторные и поршневые машины, механизмы, реакторные установки и др., статичных режимов работы [17]. Данное обстоятельство было вызвано относительно «медленным» режимом работы аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и их малой разрядно-

стью, что приводило «размытости» спектральных максимумов, соответственно снижало ценность таких оценок. Ситуация изменилась с появлением компактных и быстродействующих сборщиков данных прецизионного класса, где достижима частота дискретизации сигнала до 204,8 кГц на канал с разрядностью в 24 бита с неограниченным (ограничение только по физическим размерам носителя информации) временем записи (по материалам источника [10]).

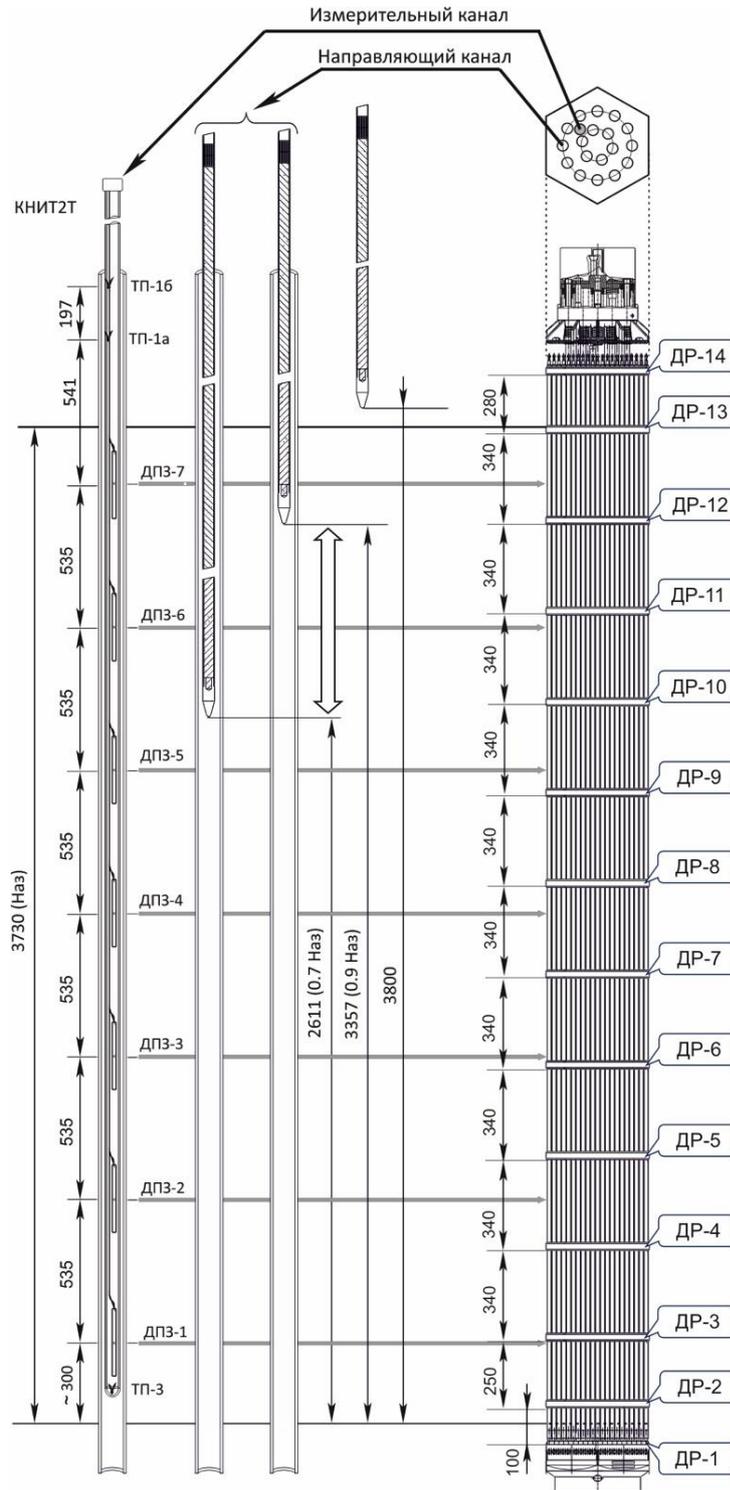


Рисунок 3. Расположение ДПЗ относительно ТВС
Figure 3. Location of the direct charge sensors relative to the fuel assembly

В работах [8–10] авторами представлены уникальные возможности данных технических средств и варианты их использования в условиях действующей АЭС. Регулярное использование измерительных средств и обобщение накопленного опыта, позволи-

ли разработать новую методику спектрального оценивания шумовой составляющей различных сигналов при нестационарных режимах эксплуатации оборудования. Интерес авторов именно к динамическим режимам понятен и закономерен.

Во-первых, любые отклонения от стационарности приводят к изменению технологических параметров, таких как температура, давление, расход и т.д., что неизбежно оказывает/не оказывает влияние на частоты в спектрах. Таким образом, отслеживая «дрейф» частоты, в зависимости от изменения технологических параметров, можно с определенной степенью уверенности говорить о природе явления, вызвавшего этот резонанс. Очень показателен пример, представленный в источнике [19], где природа резонанса 6,14 Гц объяснялась чисто механическими колебаниями ТВС, т.к. указанный максимум имел постоянную частоту при изменении температуры теплоносителя. Отсутствие связи между частотой колебаний и температурой (давлением) теплоносителя является отличительным признаком механической природы колебательного процесса в отличие от виброакустических эффектов, описанных в источнике [7]. Частота 6,14 Гц совпадает с частотами колебаний ТВС, представленным в таблицах 1 и 2 и соответствует первой гармонике колебания ТВС («Первая изгибная» по терминологии источника [12]). Из представленного примера очень хорошо видно, что в любом случае данные, полученные в результате стендовых испытаний, будут расходиться с данными, полученными при реальной эксплуатации.

Во-вторых, в переходных режимах в работу вводится (выводится) большое количество оборудования, что так же существенно расширяет охват шумового процесса, позволяют получать новые закономерности для комплексного изучения и анализа. И наконец, в-третьих, по статистике максимальное количество аномальных ситуаций, как правило, возникает именно на переходных (динамических) режимах и иметь условную бездефектную спектральную характеристику очень важно для своевременной идентификации различных аномалий.

Не смотря на все описанные выше преимущества спектральных оценок при переходных режимах, долгое время не удавалось решить главную проблему, а именно представление результатов анализа в динамике. Различные исследователи подходили к ре-

шению данной задачи разными способами. Например, В.И. Павелко ввел представление в виде «водопада спектров», где спектральные оценки выстраивались друг за другом на трехмерном графике (подробнее работы [1,8,14,15]). Данный способ хорошо зарекомендовал себя, когда для отражения динамического режима требовалось 20, максимум 25 спектров. Когда же для анализа необходимо существенно больше спектральных оценок (более 100), выделение особенностей становится затруднительным. Действительно если обратимся к практическому примеру, динамическим испытаниям на Нововоронежкой АЭС-2 в 2022г, то получим следующие значения, при частоте дискретизации 1024 Гц и длине непрерывной записи более 8 часов, количество отсчетов (мгновенных значений измеряемого параметра) будет равно 31111164. Если ограничить время расчета спектральной оценки отрезком в 100 сек, то общее количество спектров будет 303. Никакими «водопадами спектров» организовать представление в компактной и наглядной форме практически невозможно.

В работе [10] впервые предложен новый способ представления большого количества спектральных оценок в сжатом и интуитивно понятном виде. Суть метода понятна из рисунка 4б, когда области с примерно равными значениями спектральной плотности объединяются и окрашиваются в один цвет. В сущности, предложенное авторами отображение спектральных характеристик, повторяет методику воспроизведения рельефа на географических картах, когда высота гор (или глубины океанов) окрашиваются в разные цвета в зависимости от реальных значений. В нашем случае цветом будет кодироваться амплитуды, тогда все 303 расчитанных спектра создают уникальную картину шумовых процессов в динамике (спектральное поле).

На рисунке 4б воспроизведено спектральное поле нейтронного шума ДПЗ на горизонте 1 ТВС с координатами 02-23 во время динамического режима при изменении мощности в режиме 96%-56%-96% (подробнее работы [20,21]).

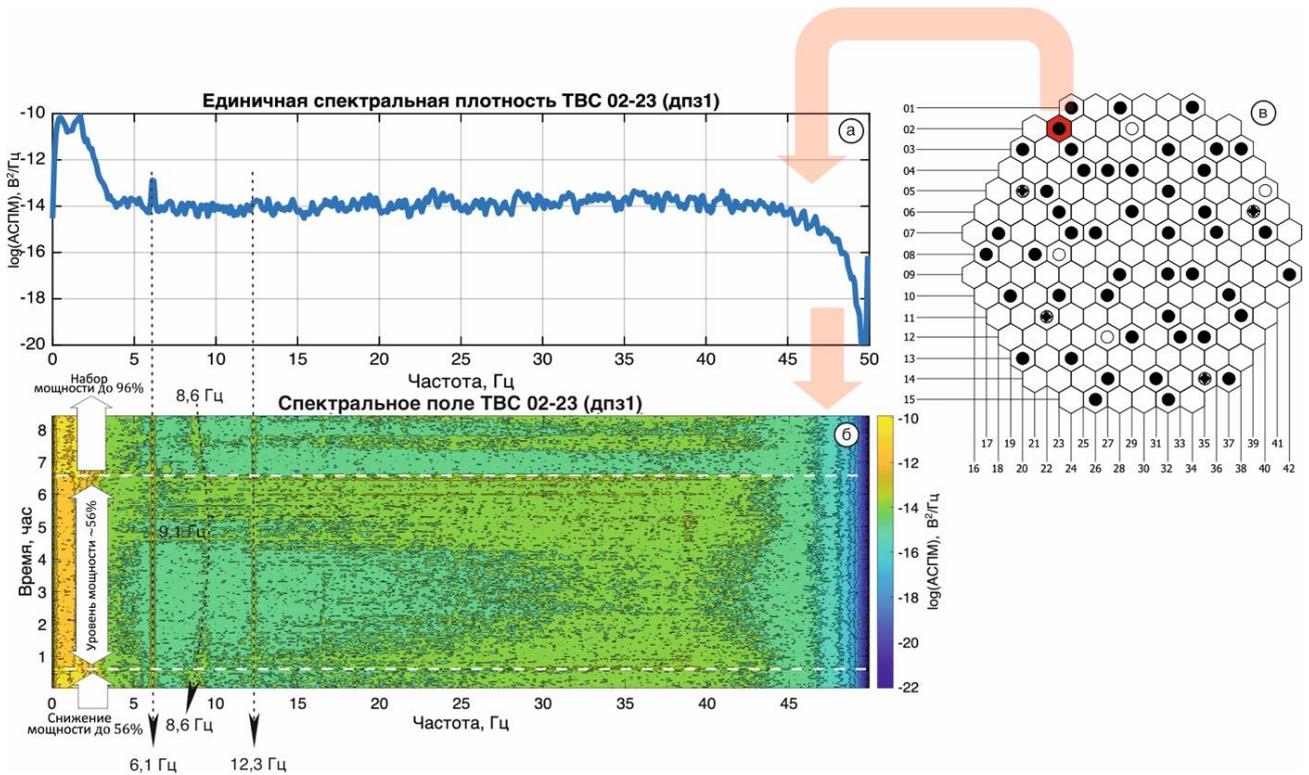


Рисунок 4. Общий вид спектрального поля для единичного датчика прямого заряда:

а – единственный спектр нейтронного шума, б – спектральное поле за время эксперимента и в – картограмма АЗ с выделенной ТВС, участвующей в эксперименте

Figure 4. General view of the spectral field for a single direct charge sensor: а – a single spectrum of neutron noise, б – the spectral field during the experiment, and в – a cartogram of the core with a dedicated fuel assembly participating in the experiment

Представление динамической информации в виде спектрального поля позволяет однозначно идентифицировать природу колебательного процесса. Так, например, неизменность (прямая линия) на частоте 6,14 Гц при изменении мощности РУ (температуры теплоносителя) говорит о механической природе, а плавное изменение частоты с 8,6 Гц до 9,1 Гц и обратно о гидродинамическом источнике, т.е. об акустической стоячей волне (подробнее источник [7]). Частота 12,3 Гц соответствует второй гармонике колебаний ТВС.

Анализ высокочастотного шума ДПЗ

Для первоначальной оценки высокочастотного шума и определение физической природы выявляемых резонансов, целесообразно использовать представление информации в виде спектрального поля при динамических режимах. Так, на рисунке 5 представлено спектральное поле нейтронного шума для ДПЗ сборки 02-23 на горизонте 7. Спектральные поля для других ДПЗ выгля-

дят аналогично рисунку 6, поэтому для упрощения восприятия информации, авторы ограничатся только одним представлением. Это первое представление высокочастотной составляющей нейтронного шума в виде спектрального поля, т.к. ранее авторы ограничивались диапазоном до 50 Гц.

Максимумы на частотах 100 Гц и 150 Гц это помехи от воздействия питающей сети. Резонансы на частотах 106,2; 108,3 Гц и 110,9 Гц представляют явный интерес. Прежде всего, на примере резонанса 106,2 Гц хорошо заметна его анизотропия от воздействия температуры при переходном режиме, т.е. колебания на этой частоте имеют явно механическую природу. С другой стороны, выявлено плавное возрастание частоты со значения 108,3 Гц до 110,9 Гц, что не позволяет сделать вывод о гидродинамическом возбуждении указанного резонанса, т.к. при увеличении температуры теплоносителя частота таких резонансов должна уменьшаться (подробнее источники [1,10]). В рассматриваемой области происходит пе-

реход энергоблока с уровня мощности 56% до 96%, поэтому температура теплоносителя должна возрастать. Рядом с ячейкой 02-23 расположена ячейка с координатами 03-24 в которой размещен регулирующий ОР группы 11 (источник [22]), поэтому логично предположить, что вибрация кластерного пучка ПЭЛ и вызывает изменения реактивности, регистрируемое ДПЗ на горизонте 7. Для доказательства данной гипотезы рассмотрим модель ОР как математического маятника, период колебания которого определяется формулой (1) по источнику [23]:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

где T – период колебаний,

l – длина математического маятника,

g – ускорение свободного падения.

Исходя из соотношения (2), формула (1) преобразуется в зависимость частоты от изменения длины математического маятника (3):

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (3)$$

где f – частота колебаний.

Исходя из формулы (3) можно утверждать, частота колебаний имеет гиперболическую зависимость при изменении длины математического маятника, с увеличением частоты колебаний при уменьшении длины математического маятника.

При детальном рассмотрении (крупный масштаб – выноска на рис. 5), хорошо видно по кривой 1 изменение частоты от времени. Учитывая, что в указанный временной интервал происходил процесс набора мощности энергоблоком, то ОР перемещались вверх, следовательно, частота должна уве-

личиваться (в соответствии с формулой (3)). Таким образом, кривая 1 описывает гиперболическую зависимость «перемещение ОР СУЗ – изменение частоты». Далее, на выноске хорошо видно, что фактически удалось зафиксировать два разных процесса. Один, (кривая 1) предположительно колебания ОР СУЗ в соседней ячейке с координатами 03-24 (изменение частоты 109,4 Гц – 110,7 Гц), другой (кривая 2) вероятно колебания еще одного ОР, который длительное время был неподвижен, но в самом конце записи начал извлекаться (конечная частота 111,0 Гц). В настоящее время трудно сделать точную привязку к конкретному ОР. Авторы, предполагают, что фактически можно отслеживать перемещение ОР с частот $\sim 106 \div 107$ Гц. Интерполировав исходную гиперболу (кривая 1) в область более низких частот (пунктирная кривая 3), можно увидеть скачкообразное изменение частоты в районе 106 Гц, что, скорее всего, соответствует началу процесса увеличения мощности энергоблока. Отсутствие явно выраженных максимумов на спектральном поле в диапазоне 106 Гц \div 109 Гц может объясняться двумя обстоятельствами. Первое, перемещение ОР происходит на нижних горизонтах и не регистрируется ДПЗ7. Второе, возможно мощность реактора не достигла порогового значения, с которого возможна надежная регистрация нейтронных шумов.

В любом случае приведенные выше экспериментальные данные позволяют создать новый независимый канал контроля реального положения ОР. Выполнив калибровку изменение частоты выделенного резонанса от перемещения ОР СУЗ в единицах длины от верха АЗ, можно получить зависимость, позволяющую с достаточной степенью точности определять реальное положение ОР в АЗ, что существенно расширяет возможности нейтронно-шумового контроля и повышает эксплуатационную безопасность.

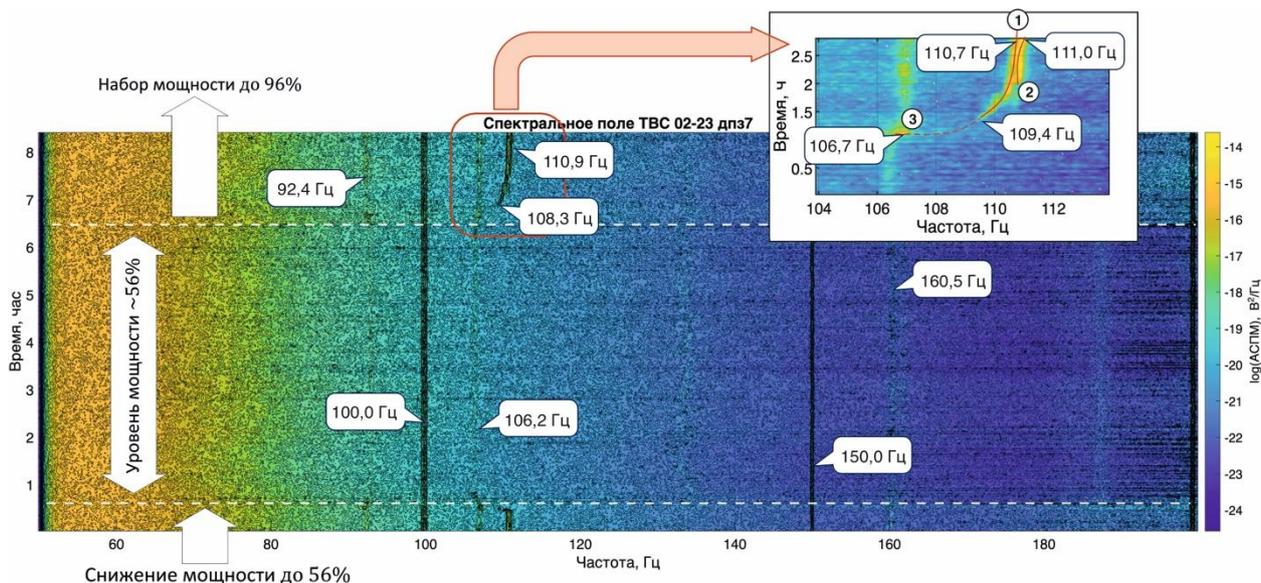


Рисунок 5. Спектральное поле ДПЗ на горизонте 7 ТВС с координатами 02-23 за 8,5 часов непрерывной записи при динамическом режиме снижения/повышения мощности (96%-56%-96%)

Figure 5. The spectral field of the direct charge sensors on the horizon of 7 fuel assemblies with coordinates 02-23 for 8.5 hours of continuous recording under the dynamic mode of decreasing power increase (96%-56%-96%)

Введенное авторами представление нейтронно-шумовой информации в виде спектрального поля, безусловно, удобно для восприятия общей картины и выявления глобальных закономерностей, но для более детального анализа необходим переход к спектральным оценкам. В связи с широким распространением мобильных анализаторов сигналов различного назначения и специализированного программного обеспечения сложилось неверное представление о сути спектрального преобразования и об используемых единицах (более подробно источники [18,24–26]). Так на рисунках 6 и 7 представлены рассчитанные спектры всех ДПЗ для сборки 02-23 (рис. 6) и для сборки 14-37 (рис. 7) для разных уровней мощности РУ – 56% и 96% от номинального значения. Единицей измерения является «автоспектральная плотность мощности (АСПМ)» с размерностью, исходные единицы временного сигнала (В, мкА, мм и т.д.) деленные на частоту в квадрате, нашем случае – $A^2/\text{Гц}$.

Очень частой ошибкой является попытка оценить размах колебаний в абсолютных единицах на определенной частоте исходя из спектральных характеристик, т.е. интерпретируя спектральную плотность как амплитуду, что в корне неверно. Реально возможна

только интегральная оценка энергии процесса в некотором, строго определенном диапазоне частот, т.к. квадрат амплитуды – это энергетическая характеристика процесса.

Методология проведения нейтронно-шумовых измерений с использованием ДПЗ предполагает точечную оценку изменения нейтронного потока, т.е. локальный результат. Поэтому существенен разброс в спектральных характеристиках не только между разными ТВС по АЗ, но и ДПЗ, расположенными на разных горизонтах в пределах одной ТВС. Положение усугубляется тем, что величина флуктуаций обычно не превышает $1 \cdot 10^{-9}$ А, а это вносит дополнительные помехи в измерительный тракт. Все сказанное хорошо известно, поэтому целесообразно рассматривать не АСПМ, а различные парные характеристики, одной из которых является функция когерентности.

Функция когерентности характеризует степень линейной зависимости между сигналами в частотной области, является безразмерной величиной и принимает значение 1, если два процесса на фиксированной частоте связаны линейно, в случае если функция когерентности равно 0, то процессы на этой частоте не связаны (более подробно [10,28]).

Исходя из рисунков 5 и 6 легко заметить, что в составеборок каналов нейтронных измерений (КНИ) могут присутствовать неисправные ДПЗ (рис. 6а и рис. 6в). Такие сигналы необходимо тщательно отфильтровать и не учитывать при анализе. Собственно анализ по спектральным оценкам требует определенного опыта. Так, например, пики, имеющие острую форму и, условно, «узкие» в основании (лежат на ограниченном количестве точек) имеют механическую природу. Классический пример – это колебания ОР СУЗ на частотах в интервале 105 Гц – 111 Гц (рис. 6б, $f = 106,4$ Гц, рис. 7б, $f = 107,1$ Гц и $f = 110,9$ Гц). Пики имеющие «плавные» вершины и «широкое» основание, как правило, связаны с гидродинамическими процессами, такими как акустические стоячие волны (подробнее [1,27]), турбулизация потока, кипение и т.д. В качестве примера, следует привести резонанс на рисунке 6в в границах $\sim f = 72,4 \div 78,6$ Гц.

При более детальном рассмотрении данных, представленных в источнике [17], можно с определенной степенью уверенности говорить о нерациональном подходе к обработке информации. Так исходя из таблицы 3, частота колебаний пучка твэл может варьироваться в пределах сотен герц, что на прак-

тике означает изменение жесткости или податливости конструкции в широчайших пределах, что невозможно. Скорее всего, то, что в источнике [11] постулируется как собственные колебания конструктивных элементов, являются результатом взаимодействием движущейся среды на твэл, т.е. вынужденные колебания. Простейшая модель такого взаимодействия это хаотичное воздействие на твэлы (в нашем случае) локальных турбулентностей, кавитационных пузырьков, пузырьков пара и других неравномерностей потока. Но так как такие процессы имеют случайный характер, и частота воздействия на конструктивные элементы носит также случайный характер, то при спектральном представлении будет выделяться некая частотная область с относительно равным заполнением, т.е. ровно то, что можно видеть в табл. 3. Не смотря большое количество теоритических и экспериментальных работ [29–31] в области расчетов и моделирования взаимодействия движущегося потока и пучка стержневых элементов (модель ТВС), имеется множество невыясненных до конца проблем. В том числе и с частотным откликом такой системы на различные гидродинамические возмущения.

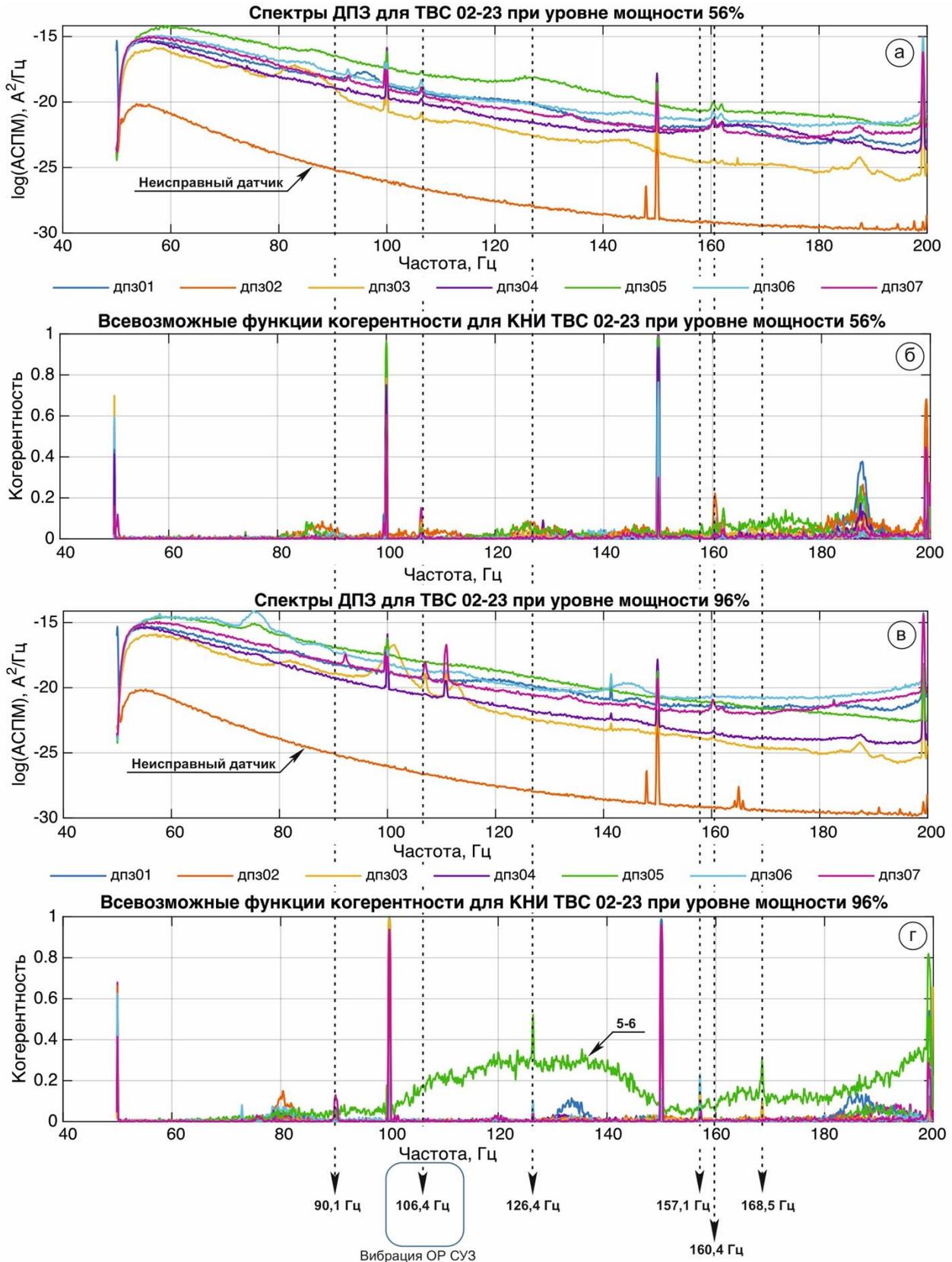


Рисунок 6. Автоспектральная плотность мощности ДПЗ для ТВС 02-23 при уровне мощности 56% (а) и 96% (в). Значение функции когерентности всевозможных комбинаций ДПЗ для ТВС 02-23 при уровне мощности 56% (б) и 96% (г)

Figure 6. Autospectral power density of the direct charge sensors on fuel assemblies 02-23 at a power level of 56% (a) and 96% (c). The value of the coherence function of various combinations of the direct charge sensors on fuel assemblies 02-23 at a power level of 56% (b) and 96% (d)

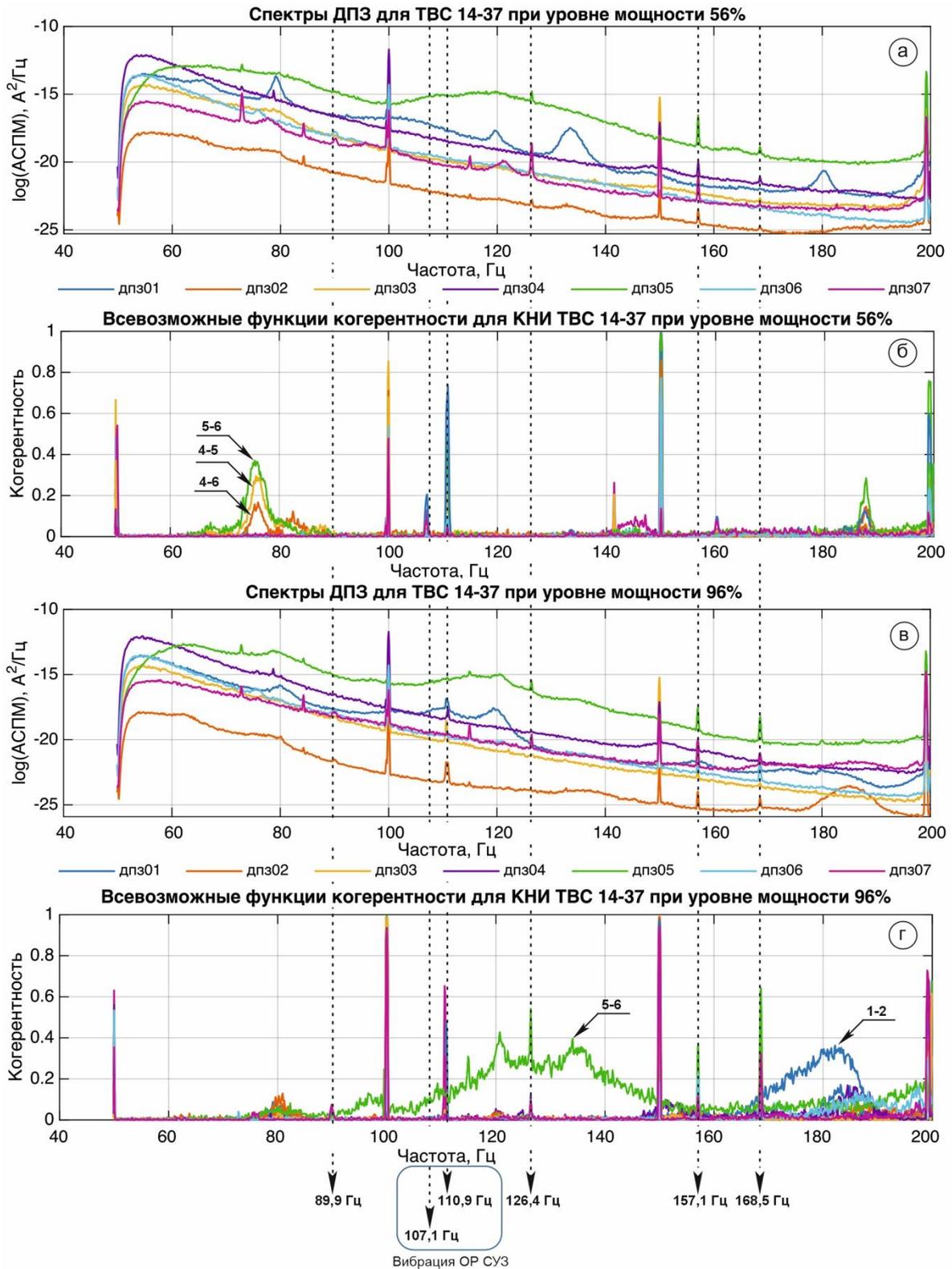


Рисунок 7. Автоспектральная плотность мощности ДПЗ для ТВС 14-37 при уровне мощности 56% (а) и 96% (в). Значение функции когерентности всевозможных комбинаций ДПЗ для ТВС 14-37 при уровне мощности 56% (б) и 96% (г)

Figure 7. Autospectral power density of the direct charge sensors on fuel assemblies 14-37 at a power level of 56% (a) and 96% (c). The value of the coherence function of various combinations of the direct charge sensors on fuel assemblies 14-37 at a power level of 56% (b) and 96% (d)

Сказанное выше хорошо иллюстрируют рисунки 6г и 7г, где функция когерентности между ДПЗ 5 и 6 имеет равномерное заполнение между частотами 90 Гц и 160 Гц (помечена 5-6), но только на мощности 96%. При уровне 56% указанный эффект отсутствует. Данный факт следует рассматривать как резкое изменение состава потока, т.е. появление паровой фракции. Когда теплоноситель однороден – между горизонтами 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, функция когерентности примерно равно нулю. При появлении пузырьков пара, происходит мгновенное изменение реактивности (увеличение пара приводит к уменьшению воды, т.е. уменьшению плотности замедлителя), регистрируемое двумя ближайшими датчиками, т.е. ДПЗ5 и ДПЗ6. Поэтому значение функции когерентности принимают значения отличные от нуля. Ввиду того, что указанный процесс хаотичен, то частота образования паровых пузырей носит случайный характер, что и сказывается на спектре – появляется область, перекрывающая определенный диапазон частот. В данном случае, можно с некоторым упрощением считать, что функция когерентности описывает частоту образования пузырьков пара. Когда процесс кипения не развит и возникают отдельные пузырьки, то в спектре выделяется одна частота (малый разброс по частоте). В случае развития кипения, образование пузырьков происходит с разными частотами, что приводит к «размытию» резонанса (рис. 6г и рис. 7г.). На рисунке 7б можно заметить резонанс с признаками кипения в самой начальной стадии (отмечен 5-6, 4-5, 4-6). При мощности РУ в 56% образование пузырьков пара единично (частота $f \sim 77$ Гц), но затрагивает уже два горизонта ДПЗ 4-5 и 5-6. Причем данный процесс регистрируется только в ТВС с координатами 14-37. Для ТВС 02-29 кипение при мощности 56% отсутствует (рис. 6б). На рисунке 7г выделяется и другая особенность – размытие функции когерентности на частоте $f \sim 180$ Гц между горизонтами 1-2. Кипением данную аномалию объяснить нельзя, т.к. теплоноситель не нагрет. По всей видимости, это как раз гидродинамическое взаимодействие между потоком теплоносителя и самой конструкцией ТВС, которое и было

обнаружено на испытательном стенде в АО ОКБ «Гидропресс» (табл. 3 – Колебания пролета между ДС-2 и ДС-3, рис. 3). Отсутствие описанного эффекта для ТВС 02-29 (рис. 6г) объясняется скорее всего выходом из строя ДПЗ2, что не позволяет рассчитать функцию когерентности между горизонтами 1 и 2 соответствующей сборки. Безусловно, предложенная модель весьма приближительна и носит чисто описательный характер, но она позволяет понять процесс и сделать три важных вывода:

- подкипание теплоносителя в ВВЭР-1200 имеет место при нормальной эксплуатации между горизонтами 5 и 6 ДПЗ;
- между горизонтами 6 и 7 кипение отсутствует, что, скорее всего, связано со схлопыванием пузырьков пара и переходом теплоносителя к однофазному состоянию;
- участок с максимальной температурой ТВС находится между горизонтами 5 и 6 ДПЗ, а не в районе ДПЗ7, где устанавливаются термопары для контроля энергонапряженности ТВС.

«Узкие» резонансы на частотах $f \sim 90$ Гц, $f = 126,4$, $f \sim 160 \div 170$ Гц (рис. 6г и рис. 7г), скорее всего, соответствуют колебаниям всего пучка ТВЭЛ и колебаниям секций ТВЭЛ между дистанционирующими решетками. Однако авторы оставляют данное утверждение пока под вопросом, т.к. требуются дополнительные исследования экспериментальных данных, полученных как при динамических режимах, так и при длительной стационарной работе энергоблоков.

Необходимость проведения дальнейших нейтронно-шумовых исследований определяется, прежде всего, испытанием на НВАЭС нового вида топлива (ТВС-5), которое имеет другое, по сравнению с ТВС-2006, конструктивное исполнение, в частности отсутствие шлинтования ТВЭЛ (для облегчения автоматической сборки/разборки ТВС). По мнению авторов, данное новшество возможно приведет как изменению частотного состава колебаний ТВЭЛ, так и к увеличению их амплитудных значений. Другими, отличными от нейтронно-шумовых методов, выявить указанные изменения в процессе работы блока на мощности невозможно.

Выводы

1. В представленной работе впервые обоснована и экспериментально доказана возможность использования высокочастотной составляющей сигналов (более 50 Гц) датчиков прямого заряда для оценки состояния АЗ.

2. Выделен частотный диапазон (105 Гц – 111 Гц), соответствующий колебаниям ОР СУЗ в АЗ и экспериментально обоснована зависимость изменения частоты колебаний от положения ОР СУЗ, что позволяет создать независимый канал контроля поло-

жения ОР на альтернативных физических принципах.

3. Экспериментально обосновано наличие подкипания теплоносителя между горизонтами 5 и 6 ДПЗ при уровне мощности, соответствующему номинальному значению.

4. Выявлены возможные собственные частоты колебаний как всего пучка ТВЭЛ, так и его отдельных секций.

5. Обоснована необходимость дальнейших нейтронно-шумовых исследований на НВАЭС, в связи с использованием нового типа топлива ТВС-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Могильнер А.И., Фокин Г.Н., Чайка Ю.В., Кузнецов Ф.М. Применение малых ЭВМ для измерения реактивности. *Атомная энергия*. 1974;36(5):358-362. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t36-5_1974/p358/ (дата обращения 26.04.2025).

Mogilner A.I., Fokin G.N., Chaika Yu.V., Kuznetsov F.M. The use of small computers for measuring reactivity. *Nuclear energy*. 1974;36(5):358-362. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t36-5_1974/p358/ (accessed: 26.04.2025).

2. Скоморохов А.О., Слепов М.Т. Контроль достоверности информации в системе вибродиагностики Нововоронежской АЭС. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 1999;1:56–63. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/1999/01.pdf> (дата обращения 26.04.2025).

Skomorokhov A.O., Slepov M.T. Verification of information reliability in the vibrodiagnostics system of the Novovoronezh NPP. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*. 1999;1:56–63. (In Russ.). Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/1999/01.pdf> (accessed: 26.04.2025).

3. Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. The experimental definition of the acoustic standing waves series shapes, formed in the coolant of the primary circuit of VVER-440 type reactor. *Progress in nuclear energy*. 1995;29(3/4):153–170. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00005-5](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00005-5)

4. Булавин В.В., Гутцев Д.Ф., Павелко В.И. Исследования характеристик вибродиагностики ВВЭР-1000 в эксплуатационных. *Атомная энергия*. 1995;79(5):343–349. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4797> (дата обращения: 26.04.2025).

Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. Research of VVER-1000 vibration diagnostics characteristics in operating conditions. *Atomic energy*. 1995;79(5):343–349. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4797> (accessed: 26.04.2025).

5. Katona T., Mesko L., Por G., Valko J. Problems of estimation of the thermohydraulic parameters using neutron and temperature noise signals in PWR's. *Progress in nuclear energy*. 1985;15:359–364. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(88\)90061-3](https://doi.org/10.1016/0149-1970(88)90061-3)

6. Katona T., Mesko L. Investigation of the noise source characteristics. *Progress in nuclear energy*. 1985;15: 685–698. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(85\)90097-6](https://doi.org/10.1016/0149-1970(85)90097-6)

7. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200: Монография. Москва: Наука, 2018. 472 с. ISBN978-5-02-040138-9. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p2/ (дата обращения 26.04.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroacoustics in applications to the VVER-1200 reactor unit: Monograph. Moscow: Nauka, 2018. 469 p. ISBN 978-5-02-040138-9. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p0/ (accessed: 26.04.2025).

8. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200: Монография. Москва: Наука, 2021. Ч.1. 222 с. ISBN 978-5-02-040869-2 Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=okrpeg&ysclid=mfmah2t689587940434> (дата обращения 26.04.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Noise monitoring in applications to the VVER-1200 reactor unit: Monograph. (Library of technical diagnostics of nuclear power plants). Moscow: Nauka, 2021. Part 1. 216 p. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=okrpeg&ysclid=mfmah2t689587940434> (accessed: 26.04.2025).

9. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2016;4:44–54. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

Pavelko V.I., Slepov M.T., Khairetdinov V.U. Experience of conducting complex measurements using heterogeneous systems at various stages of starting up the VVER-1200 power unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016;4:44–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

10. Слепов М.Т. Методология комплексного шумового контроля оборудования ВВЭР-1200: Диссертация доктора технических наук по специальности 2.4.9. Москва, 2025. 307 с. Режим доступа: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=d85d6ba3b1ceda6ed461dfbfff281ee&irbDb=ESVODT> (дата обращения 26.04.2025).

Slepov M.T. Methodology of comprehensive noise control of VVER-1200 equipment: Doctor of technical sciences dissertation speciality 2.4.9. Moscow, 2025. 307 p. (In Russ.). Available at: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=d85d6ba3b1ceda6ed461dfbfff281ee&irbDb=ESVODT> (accessed: 26.04.2025).

11. Поваров В.П., Украинцев В.Ф., Голубев Е.И., Жук М.М. Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР-1200. Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. 264 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46457259&ysclid=mfmauqzvta741071478> (дата обращения 26.04.2025).

Povarov V.P., Ukraintsev V.F., Golubev E.I., Zhuk M.M. Experimental research of neutron-physical processes in the VVER-1200 core. Novovoronezh: LLC RPG «Ninth Cloud», 2021. 264 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46457259&ysclid=mfmauqzvta741071478> (accessed: 26.04.2025).

12. Сборка тепловыделяющая ядерного реактора: Пояснительная записка 2006.В.132.&0UJA&&.ЖКА&&.021СА.0006 392М.06.16.01 ПЗ. Подольск: АО ОКБ «Гидропресс», 2009. 102 с. Режим доступа: внутренний документ организации (доступ по запросу).

Assembly of a nuclear reactor heat-generating assembly: Explanatory note 2006.V.132.&0UJA&&.ЖКА&&.021СА.0006 392М.06.16.01 PZ. Podolsk: JSC ОКБ Hidropress, 2009. 102 p. (In Russ.). Available at: internal document of the organization (access upon request).

13. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Практические возможности и перспективы развития нейтронно-шумовой диагностики активных зон ВВЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-реакторные константы»*. 2022;1:74–82. Режим доступа: <https://vant.ippe.ru/year2022/1/radiation-technologies/2117-7.html> (дата обращения 26.04.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. Practical possibilities and prospects for the development of neutron-noise diagnostics of VVER active zones. *Issues of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Reactor Constants»*. 2022;1:74–82. (In Russ.). Available at: <https://vant.ippe.ru/year2022/1/radiation-technologies/2117-7.html> (accessed: 26.04.2025).

14. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Вибросостояние корпуса и внутрикорпусных устройств реакторной установки ВВЭР-1200. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2022;1(136):54–67. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_547

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibration condition of the vessel and in-vessel devices of the VVER-1200 reactor unit. *Proceedings of NSTU named after P.E. Alekseev*. 2022;1(136):54–67. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_547

15. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с. Режим доступа: <https://diaprom.ru/publication/?id=7> (дата обращения 26.04.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. VVER Vibronoise diagnostics. Moscow: Energoatomizdat, 2004. 344 p. (In Russ.). Available at: <https://diaprom.ru/publication/?id=7> (accessed: 26.04.2025).

16. Драгунов Ю.Г., Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков твэлов ТВС ВВЭР в турбулентном потоке теплоносителя. *Атомная энергия*. 2012;113(4): 237–240. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t113-4_2012/p237/ (дата обращения 26.04.2025).

Dragunov Yu.G., Solonin V.I., Perevezentsev V.V. Experimental studies of dynamic characteristics of fuel element bundles of VVER fuel assemblies in a turbulent flow of a heat carrier. *Nuclear energy*. 2012;113(4): 237–240. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t113-4_2012/p237/ (accessed: 26.04.2025).

17. Отчет о научно-исследовательской работе «Вибрационные испытания макета №2 ТВС-5» 545-О-004. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2022. 34 с. Режим доступа: внутренний документ организации (доступ по запросу).

Research Report «Vibration tests of model No.2 TVS-5» 545-O-004 Podolsk: ОКБ «Gidropress», 2022. 34 p. (In Russ.). Available at: internal document of the organization (access upon request).

18. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 768 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004829046?ysclid=mfmmbcsg2z945862045> (дата обращения 26.04.2025).

Sergienko A.B. Digital signal processing. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 768 p.: ill. (Educational literature for universities). (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004829046?ysclid=mfmmbcsg2z945862045> (accessed: 26.04.2025).

19. Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовые методы контроля активных зон ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):55–70. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron-noise methods of monitoring VVER active zones. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):55–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

20. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ «быстрых» шумовых измерений динамических процессов ВВЭР. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2023;4:19–36, <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02>

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of «fast» noise measurements of VVER dynamic processes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*. 2023;4:19–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02>

21. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2023;4(143):51–61. doi: [10.46960/1816-210X_2023_4_51](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51)

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of the noise component of direct charge sensor signals in VVER manoeuvring modes. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*. 2023;4(143):51–61. (In Russ.). doi: [10.46960/1816-210X_2023_4_51](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51)

22. Поваров В.П., Голубев Е.И., Жук М.М. Физика реактора ВВЭР-1200 и эксплуатационные вопросы: Научно-практическое пособие. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», 2025. Белгород: Константа, 2025. 332 с. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/24945c8f-a0a0-440b-a4ac-14b97d9b2d59> (дата обращения 26.04.2025).

Povarov V.P., Golubev E.I., Zhuk M.M. Physics of the VVER-1200 reactor and operational issues: Scientific and practical guide. Novovoronezh Nuclear Power Plant Branch of Rosenergoatom Concern, 2025; Belgorod: Konstanta, 2025. 332 p. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/24945c8f-a0a0-440b-a4ac-14b97d9b2d59> (accessed: 26.04.2025).

23. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. Москва: Наука, 1966. 247 с. Режим доступа: <https://spbib.ru/ru/catalog/-/books/10582435-spravochnik-po-elementarnoy-fizike?ysclid=mfmбуhsu083817273> (дата обращения 26.04.2025).

Koshkin, N.I., Shirkevich, M.G. Handbook of elementary physics. Moscow: Nauka, 1966. 247 p. (In Russ.). Available at: <https://spbib.ru/ru/catalog/-/books/10582435-spravochnik-po-elementarnoy-fizike?ysclid=mfmбуhsu083817273> (accessed: 26.04.2025).

24. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х томах. Москва: Мир, 1983. Т.1. 311 с. Т.2. 256 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/K3IC6BeOTm01w>, <https://djvu.online/file/IMvGuF5s3NoYZ> (дата обращения 26.04.2025).

Max J. Methods and Techniques of Signal Processing in Physical Measurements: in 2 volumes. – Moscow: Mir, 1983. Vol. 1. 311 p. Vol. 2. 256 p. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/K3IC6BeOTm01w>, <https://djvu.online/file/IMvGuF5s3NoYZ> (accessed: 26.04.2025).

25. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. Москва: Техносфера, 2006. 856 с. ISBN 5-94836-077-6. Режим доступа: <https://djvu.online/file/RcExf7aDfNjrB> (дата обращения 26.04.2025).

Oppenheim A., Shafer R. Digital Signal Processing. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 856 p. ISBN 5-94836-077-6. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/RcExf7aDfNjrB> (accessed: 26.04.2025).

26. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: 2 издание. Москва: ООО «Бином-Пресс», 2006 г. 656 с., ISBN 5-9518-0149-4. Режим доступа: <https://djvu.online/file/DW2v6v0QAUXzZ> (дата обращения 26.04.2025).

Lyons R. Digital Signal Processing: 2nd Edition. Moscow: Binom-Press LLC, 2006. 656 p., ISBN 5-9518-0149-4. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/DW2v6v0QAUXzZ> (accessed: 26.04.2025).

27. Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Поле акустических стоячих волн в контурах циркуляции ВВЭР. *Теплоэнергетика*. 2025;4:51–63. <https://doi.org/10.56304/S0040363625700778>

Arkadov G.V., Slepov M.T. The field of acoustic standing waves in VVER circulation loops. *Thermal power engineering*. 2025;4:51–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.56304/S0040363625700778>

28. Рандалл Р.Б. Частотный анализ. Перевод с английского. Дания, Брюль и Кьер, Москва: Мир, 1989. 389 с. Режим доступа: <https://z-lib.fm/book/2964471/2d2957/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7.html> (дата обращения 26.04.2025).

Randall R.B. Frequency Analysis. Translated from English. Denmark, Brüel and Kjør, Moscow: Mir, 1989. 389 p. (In Russ.). Available at: <https://z-lib.fm/book/2964471/2d2957/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7.html> (accessed: 26.04.2025).

29. Перевезенцев В.В., Солонин В.И., Сорокин Ф.Д. Нестационарные гидродинамические нагрузки и вибрации пучка твэлов в ТВС ВВЭР-440. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2008;4:23–29. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11701040&ysclid=mfmfc9croh89749197> (дата обращения 26.04.2025).

Perevezentsev V.V., Solonin V.I., Sorokin F.D. Non-stationary hydrodynamic loads and vibrations of a bundle of fuel elements in a VVER-440 reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2008;4:23–29. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11701040&ysclid=mfmc79croh89749197> (accessed: 26.04.2025).

30. Крапивцев В.Г., Марков П.В., Солонин В.И. Течение и теплоперенос в пучках стержневых твэлов водоохлаждаемых реакторов с модифицированными сотовыми дистанционирующими решетками. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2015;3:97–105. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.3.10>

Krapivtsev V.G., Markov P.V., Solonin V.I. Flow and Heat Transfer in Bundles of Rod Fuel Elements of Water-Cooled Reactors with Modified Honeycomb Spacers. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*. 2015;3:97–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2015.3.10>

31. Перевезенцев В.В. Случайные гидродинамические нагрузки и вибрации твэлов в турбулентном потоке теплоносителя в ТВС ВВЭР. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2012;2:102–111. Режим доступа: <https://nuclear-power-engineering.ru/article/2012/02/13/?ysclid=mfmc9uzwc586702360> (дата обращения 26.04.2025).

Perevezentsev V.V. Random hydrodynamic loads and vibrations of fuel elements in a turbulent coolant flow in a VVER fuel assembly. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2012;2:102–111. (In Russ.). Available at: <https://nuclear-power-engineering.ru/article/2012/02/13/?ysclid=mfmc9uzwc586702360> (accessed: 26.04.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Аркадов Г.В. – обработка результатов исследования, разработка алгоритмов обработки, проведение расчетов;

Слепов М.Т. – формулировка идеи и целей исследования, проведение исследований на АЭС, визуализация экспериментальных данных, разработка направлений исследований, выявление закономерностей.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Arkadov G.V. – processing of research results, development of processing algorithms, identification of patterns, carrying out calculations;

Slepov M.T. – formulation of the idea and objectives of the research, conducting research at nuclear power plants, visualization of experimental data, development of research directions.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

FUNDING:

The work is carried out without using external sources of financing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Геннадий Викторович Аркадов – кандидат технических наук, генеральный директор, Некоммерческое партнерство содействия развитию системной инженерии «Райз», г. Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0009-0005-4464-9973>,

e-mail: arkgen47@gmail.com

Михаил Тимофеевич Слепов – доктор технических наук, начальник отдела филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежской области, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0001-5563-0526>

e-mail: tymofeecht@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Gennady V. Arkadov – Cand. Sci. (Engin), Director General, «Rise» non-profit partnership for system engineering development support, Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0005-4464-9973>,

e-mail: arkgen47@gmail.com

Mikhail T. Slepov – Dr. Sci. (Engin.), Head of the Department of Novovoronezh NPP the Branch of JSC Concern Rosenergoatom, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-5563-0526>

e-mail: tymofeech@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 28.05.2025

После доработки / Revision 09.08.2025

Принята к публикации / Accepted 14.08.2025